

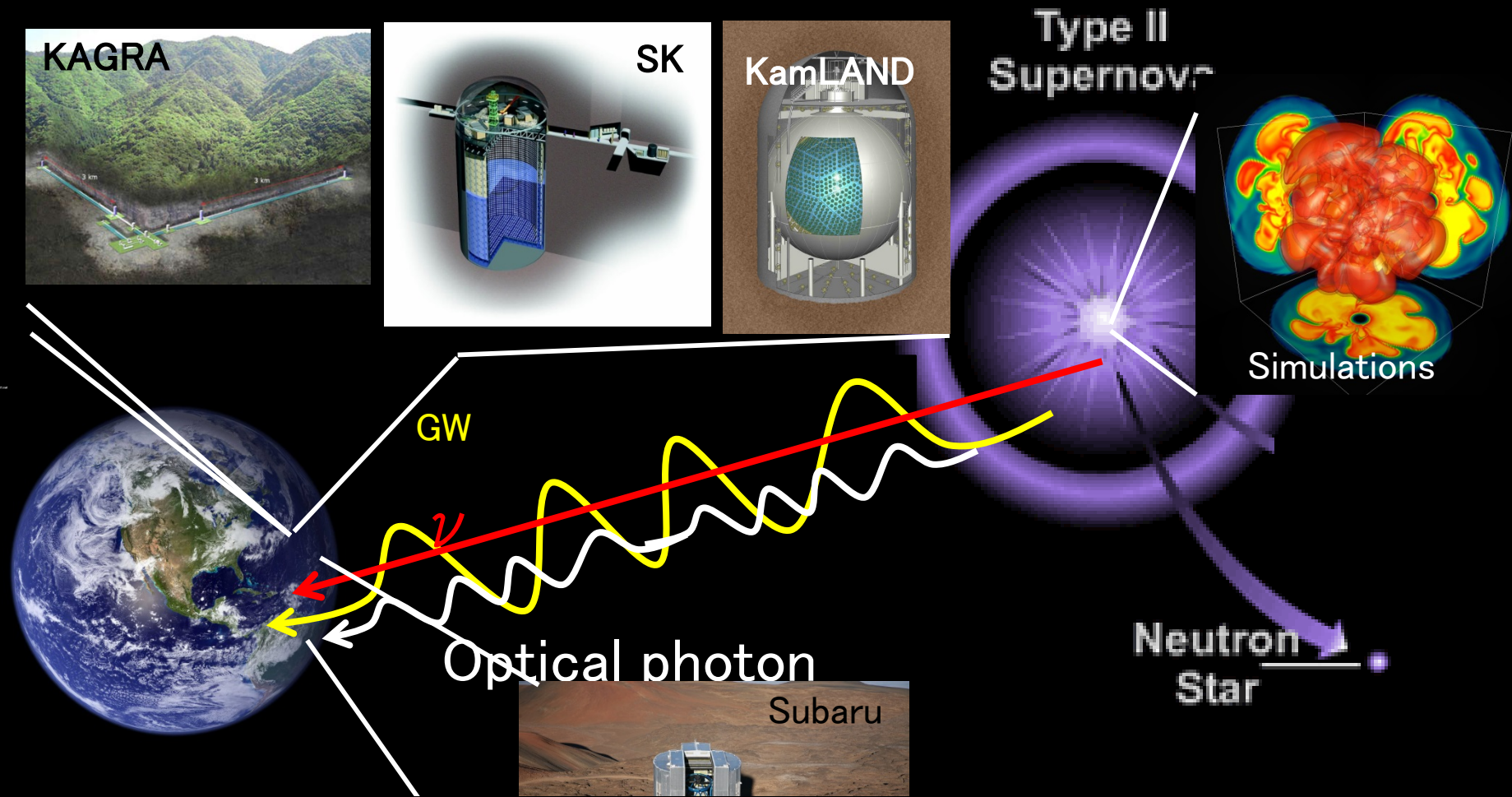
超新星ニュートリノの系統的予言

~ニュートリノ観測に拠る超新星内の流体不安定性の解明~



滝脇知也
(国立天文台)

超新星爆発から ニュートリノ、重力波、光が届く



超新星爆発の ν で何が分かりたいのか？

天文としての問題

超新星の親星が知りたい

超新星の爆発機構が知りたい

超新星率、BH生成率が知りたい

核物理・ニュートリノ物理

原子核の硬さが知りたい

ニュートリノの性質が知りたい

超新星爆発の ν で何が分かりたいのか？

天文としての問題

超新星の親星が知りたい

超新星の爆発機構が知りたい

超新星率、BH生成率が知りたい

石徹白計画研究

滝脇公募研究1

中村公募研究

中里公募研究

核物理・ニュートリノ物理

原子核の硬さが知りたい

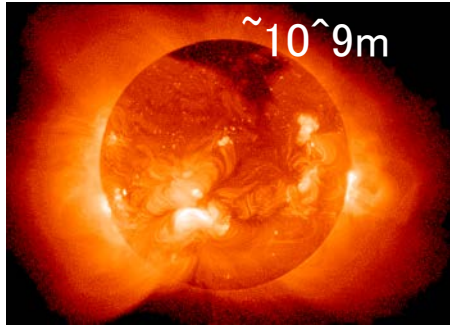
ニュートリノの性質が知りたい

滝脇公募研究2

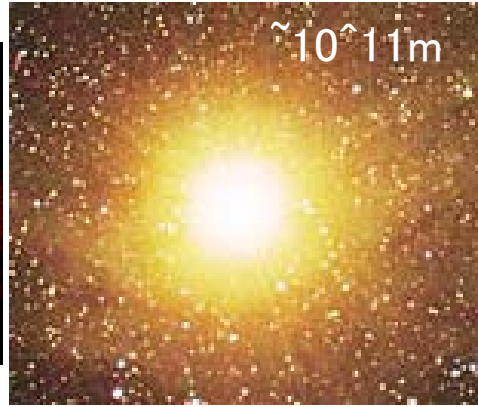
公募研究

- 公募研究1(2015-2016年度)
ニュートリノ観測に拠る超新星内の流体不安定性の解明
- 公募研究2(2017-2018年度)
超新星ニュートリノの系統的予言

星の一生と最期の大爆発



主系列星(太陽)
 ~ 1000 万年



赤色巨星(アンタレス)
重い星は短命



超新星爆発(1987A)
100日

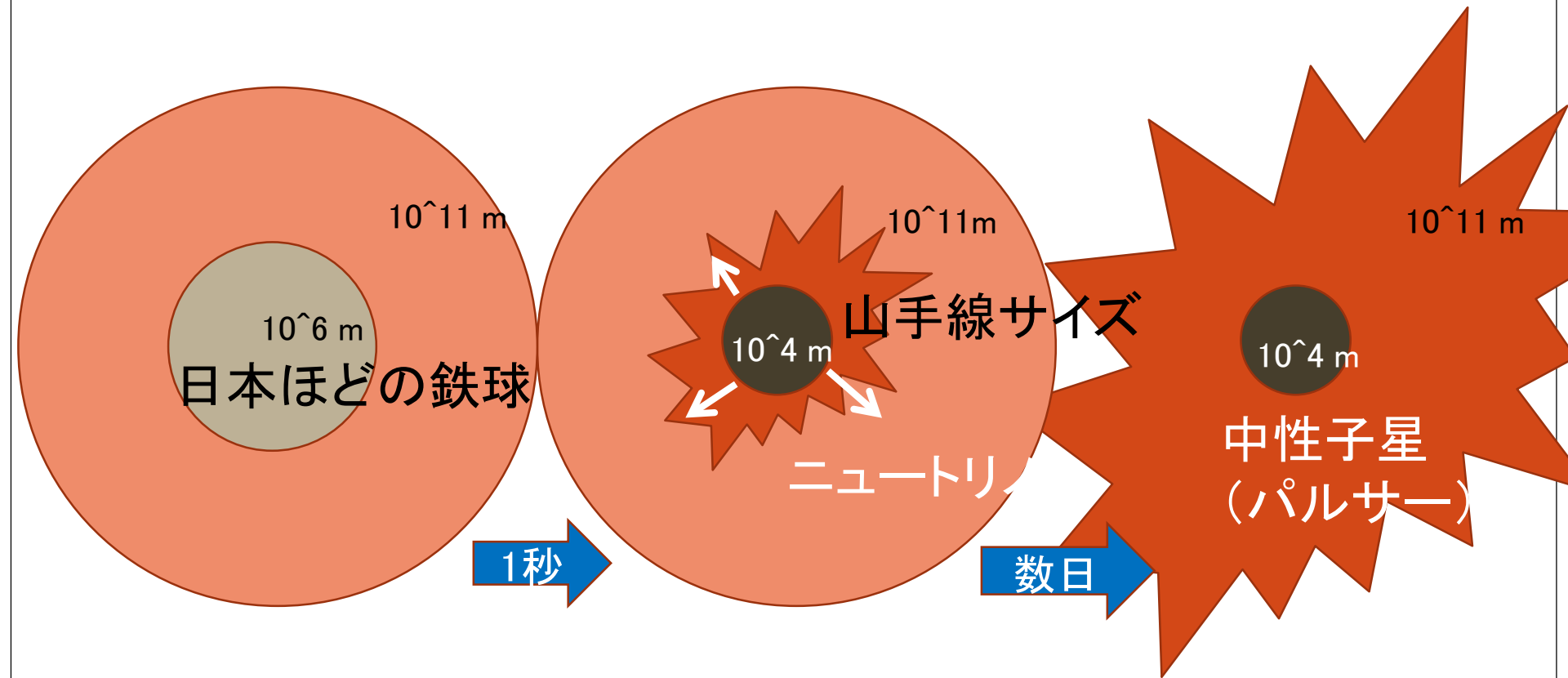


超新星残骸(Cas A)
 ~ 500 年



実は、ここでどうして爆発するのか
はっきりわかってない！

超新星爆発の仮説



超新星は日本ほどの鉄玉が1秒で10kmに収縮して、
その収縮した分のエネルギーで外側を爆発させる現象！
不思議なことにニュートリノが爆発を後押しする！

超新星の爆発メカニズムの進展

2001 $15M_{\odot}$ の星が1次元で爆発しない。

(Liebendoefer+01, Rampp+02, Thompson+03, Sumiyoshi+2005)

2006 $8.8M_{\odot}$ の星が1次元で爆発(Kitaura+06)

2006 $11.2, 15M_{\odot}$ の星が2次元計算で爆発(Buras+06, Marek+09)

2012 $11.2M_{\odot}$ の星で初めての3次元計算(Takiwaki+2012)

2016 $11.2, 20, 27M_{\odot}$ などいろいろな星の3次元計算

爆発しないモデル、元気がないモデル、元気なモデル

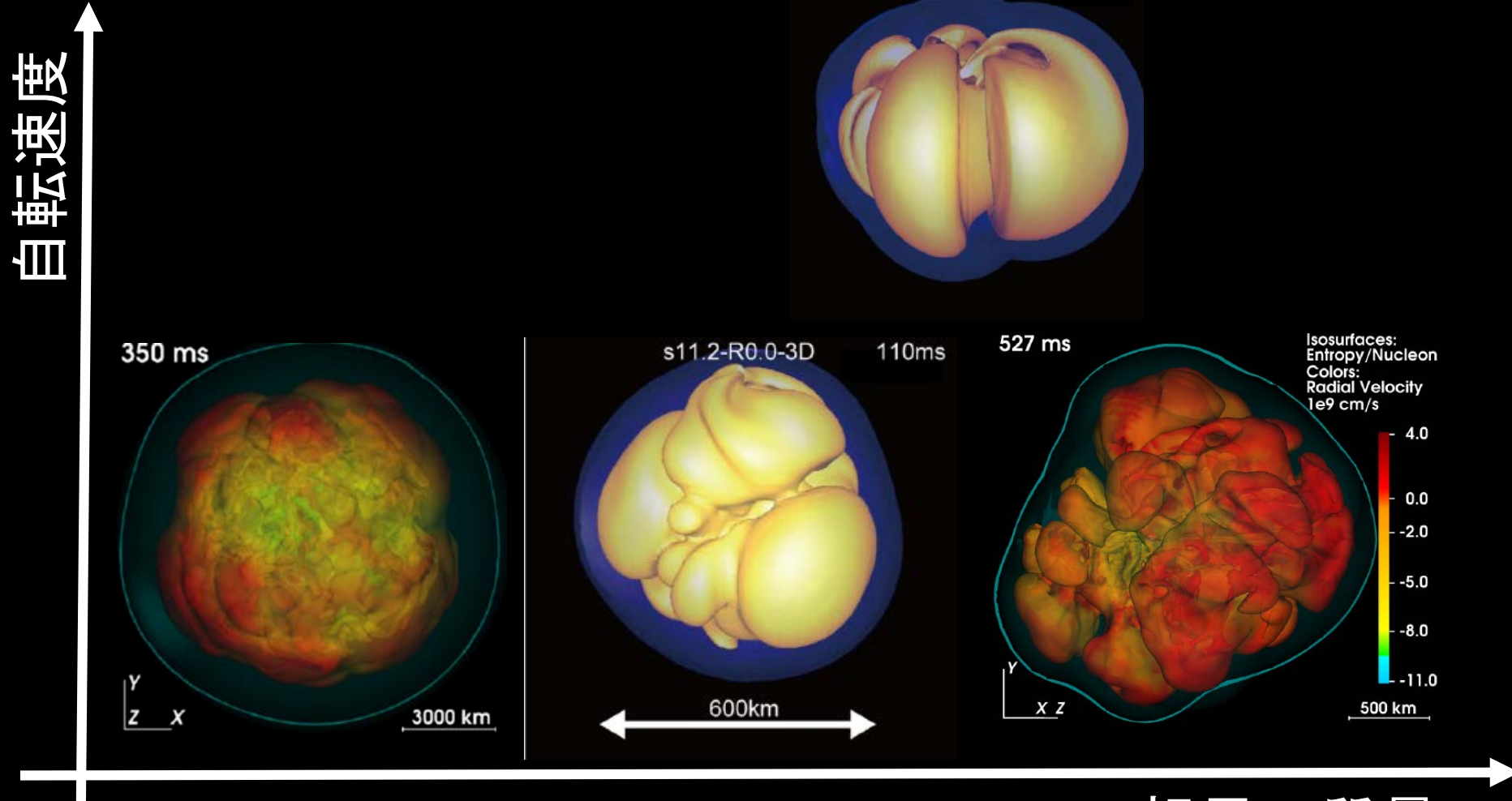
爆発しないモデルは論文にしにくいバイアス(笑)

(Hanke+13, Meller+15, Melson+16ab, Takiwaki+2016)

∨ 反応率や流体の解像度の向上が必要！

疑いないこと = 多次元で起こる流体不安定性の重要性

様々な爆発メカニズム



親星の質量*

親星の質量*: 実際はコンパクトネス $\xi = M/R$

Melson+16 a,b, Takiwaki+16

様々な爆発メカニズム

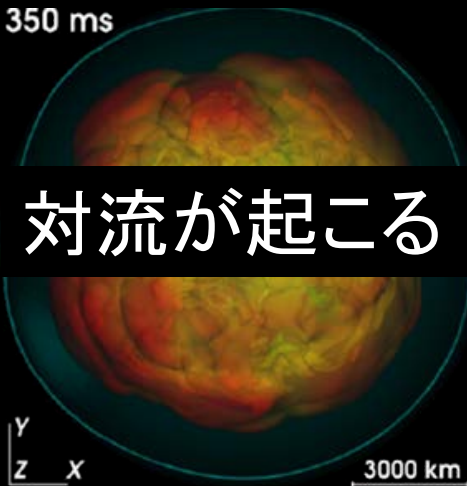
自転速度 ↑

s27.0-R2.0-3D 150ms

非軸対称不安定性が
起こる

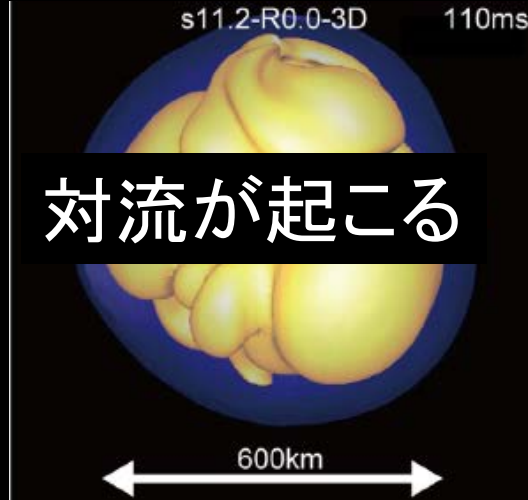
350 ms

対流が起こる



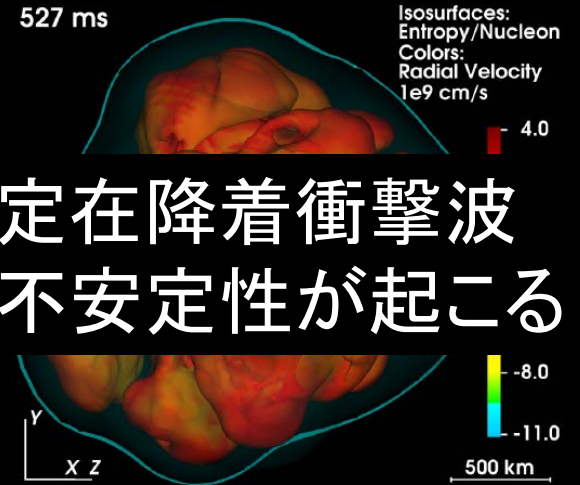
s11.2-R0.0-3D 110ms

対流が起こる



527 ms

定在降着衝撃波
不安定性が起こる



親星の質量*

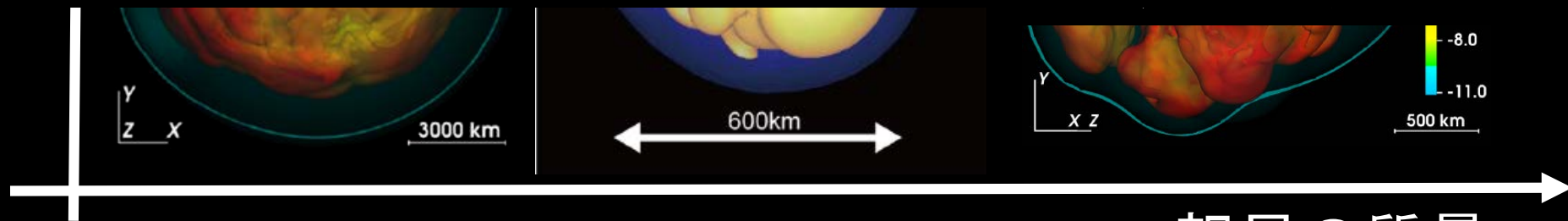
親星の質量*: 実際はコンパクトネス $\xi = M/R$

Melson+16 a,b, Takiwaki+16

様々な爆発メカニズム

s27.0-R2.0-3D 150ms

ニュートリノや重力波で
どういうシグナルが見えるか？



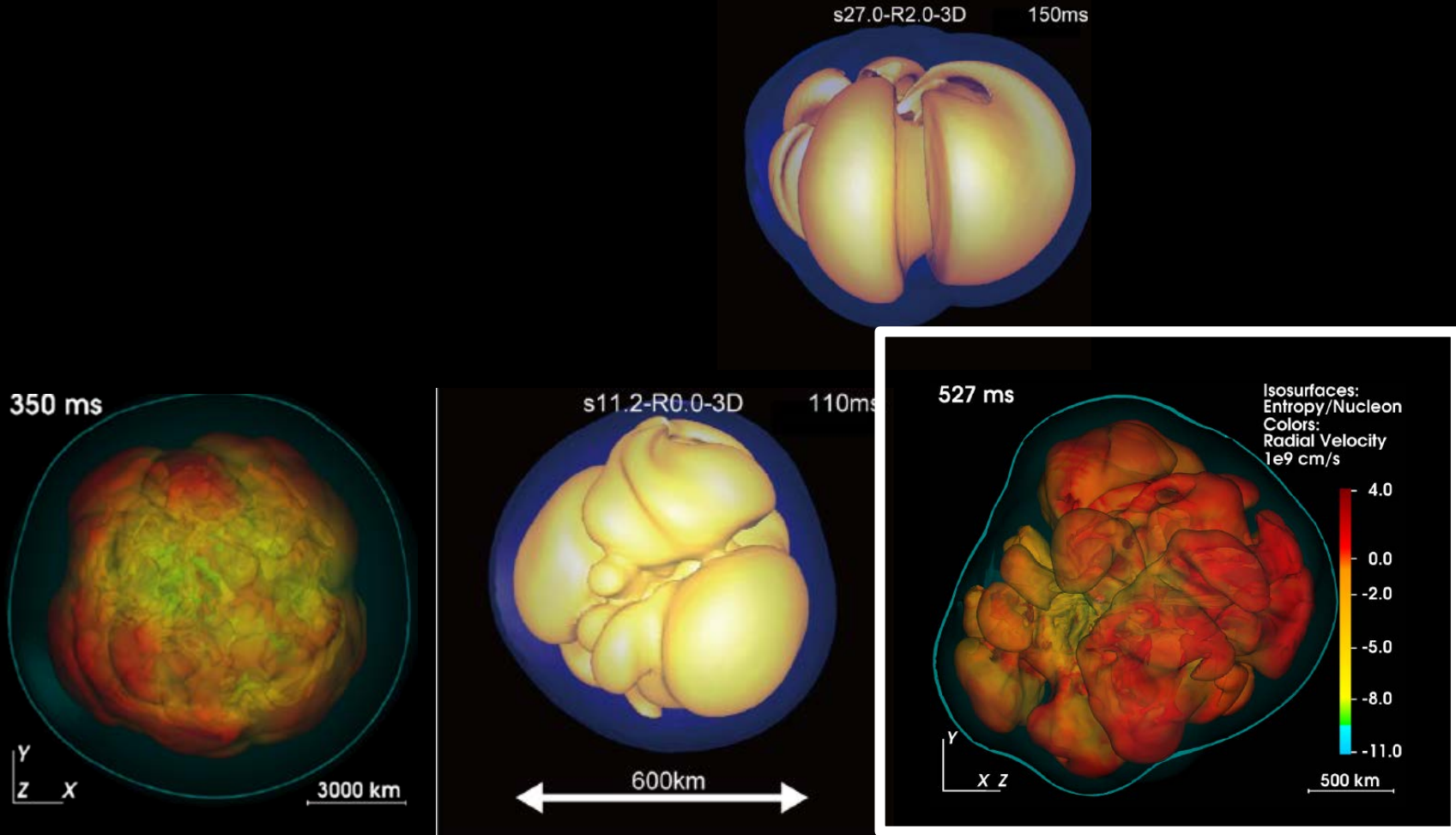
親星の質量*

親星の質量*: 実際はコンパクトネス $\xi = M/R$

Melson+16 a,b, Takiwaki+16

様々な爆発メカニズム

自転速度 ↑



親星の質量*

親星の質量*: 実際はコンパクトネス $\xi = M/R$

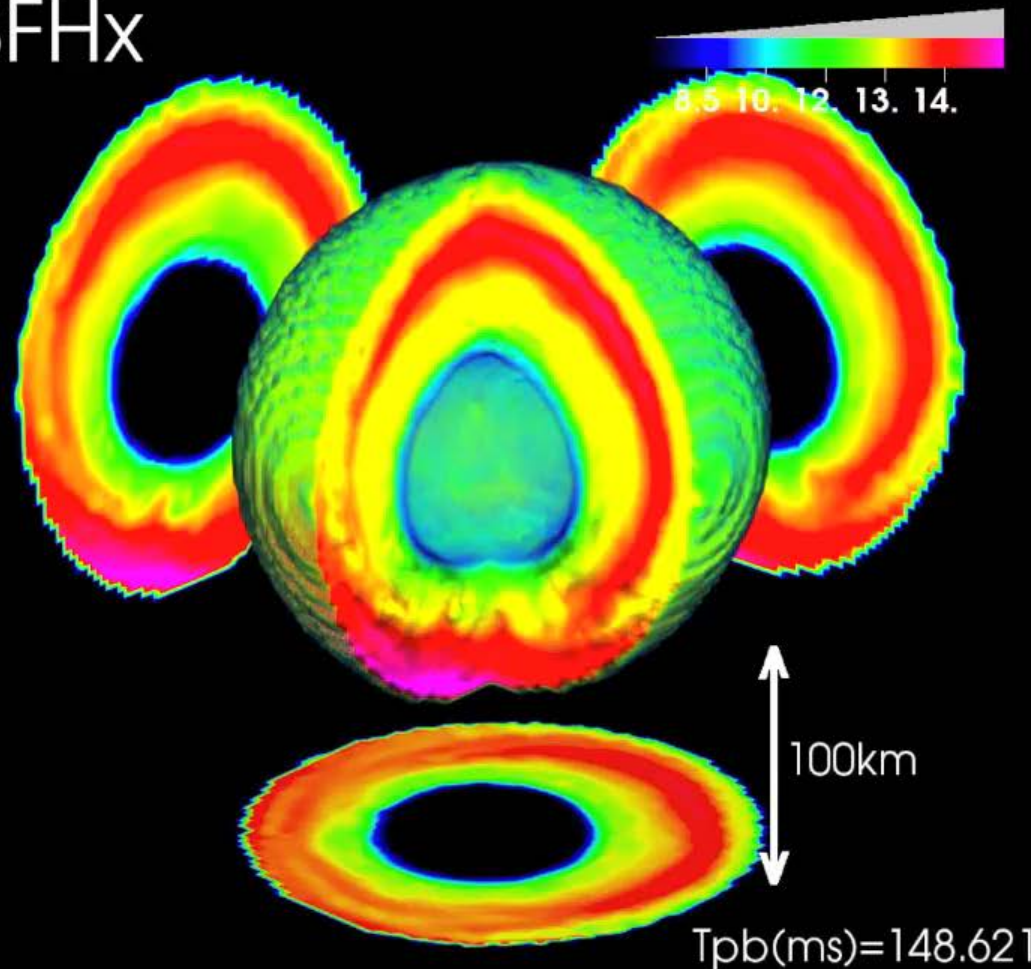
Melson+16 a,b, Takiwaki+16

3D simulation

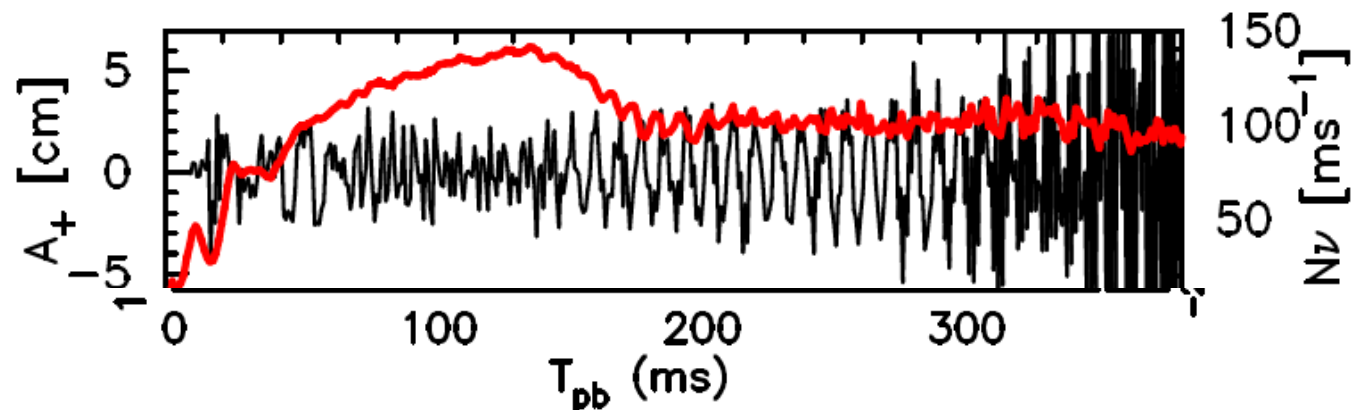
Kuroda et al. in 2016

SFHx

15M_s
GR
Leakage



ニュートリノと重力波のシグナル

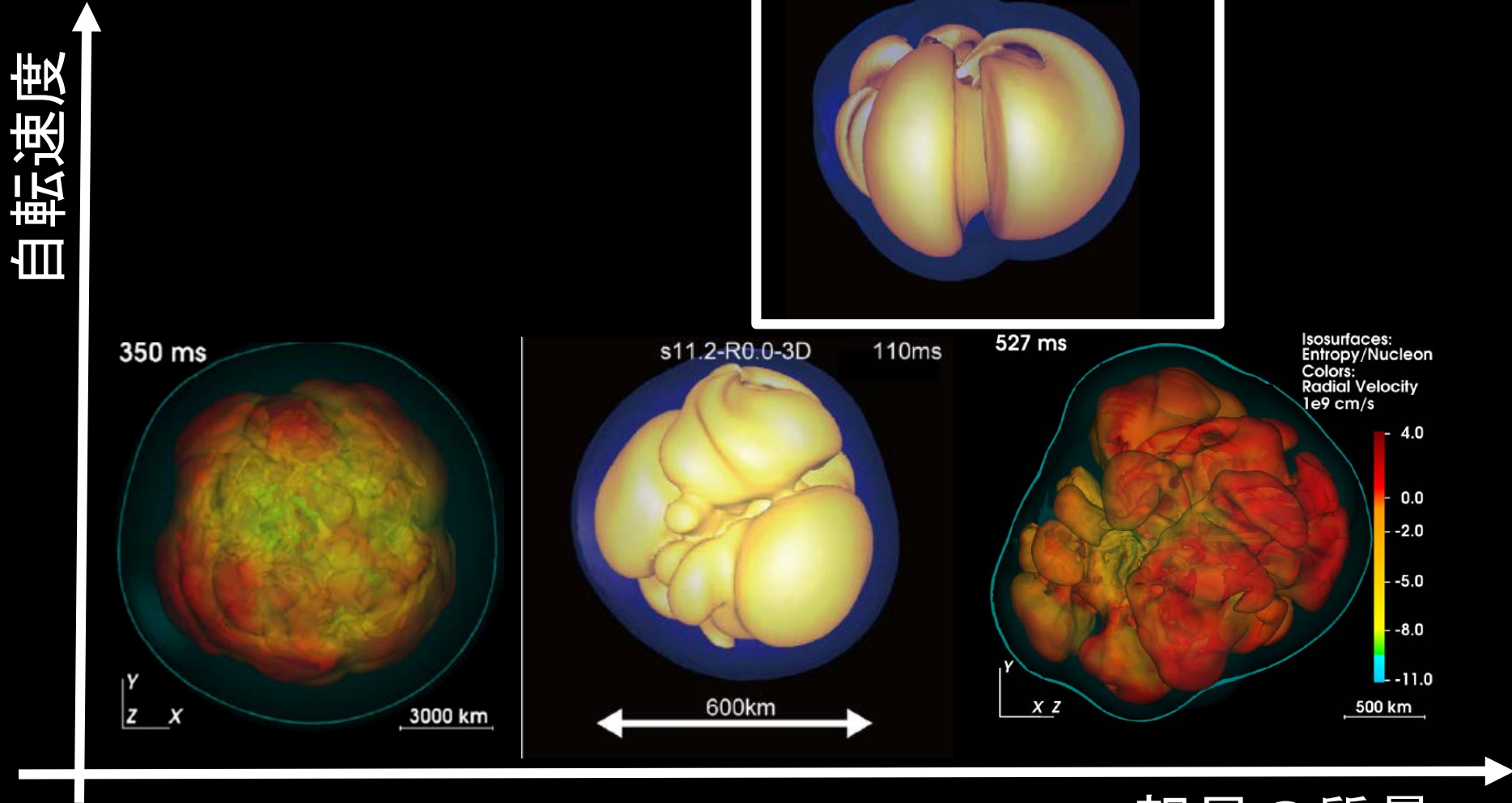


ニュートリノも重力波もおおよそ100Hzの時間振動！

重力波はおおよそ全方向から。

ニュートリノは振動の真横からは見えない(おおよそ五分五分かと)。

様々な爆発メカニズム

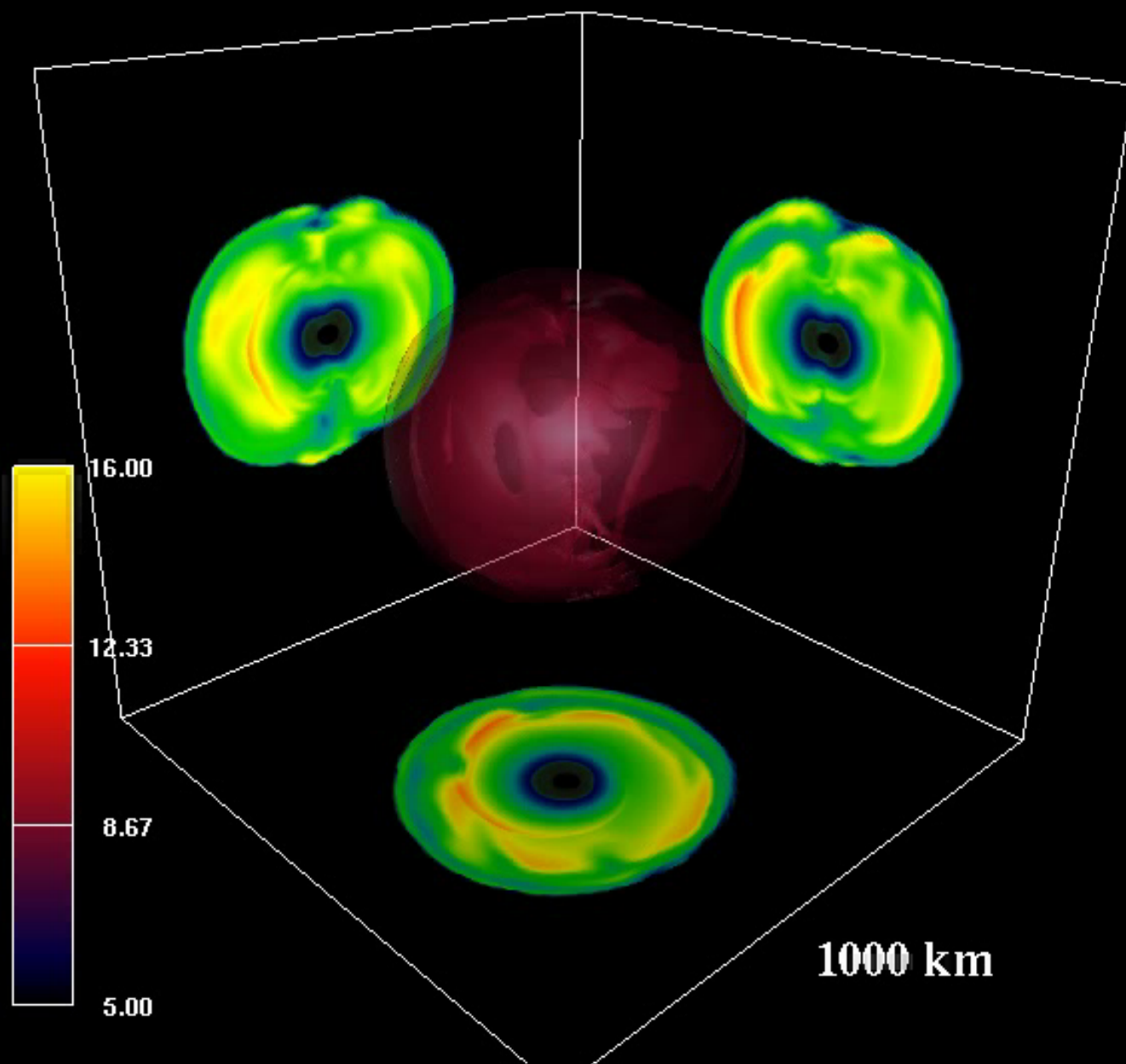


親星の質量*: 実際はコンパクトネス $\xi = M/R$

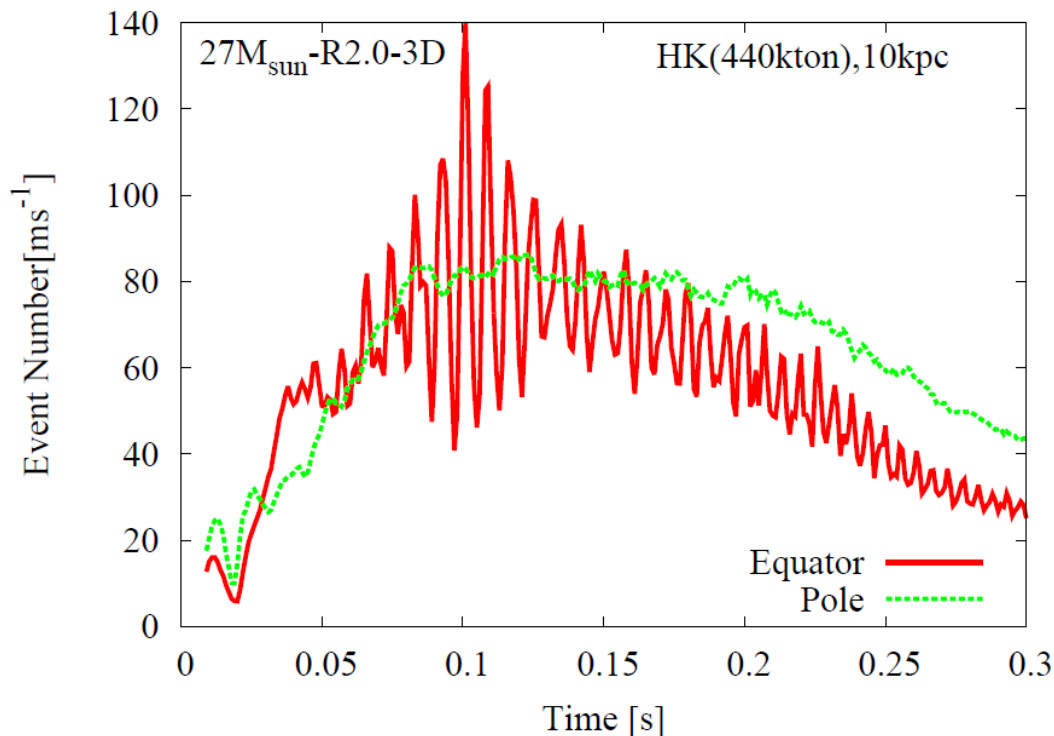
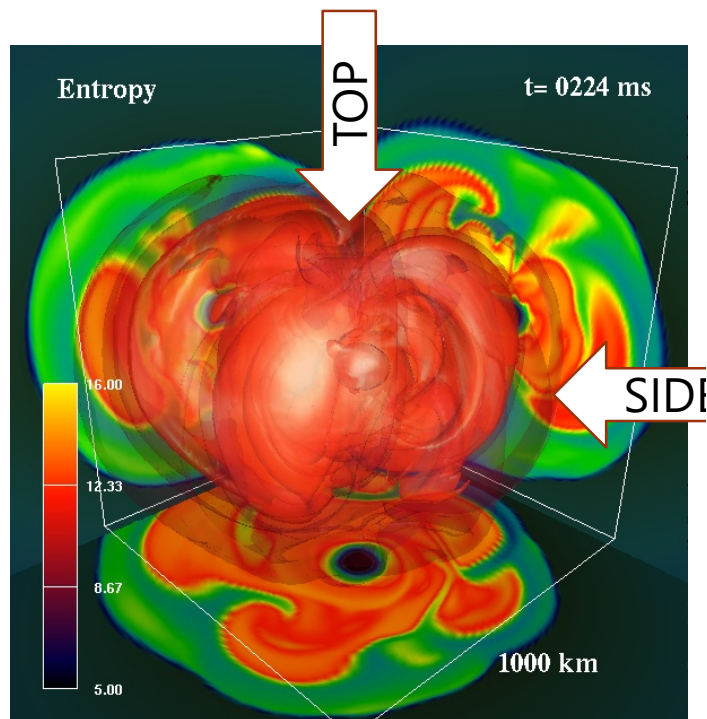
Melson+16 a,b, Takiwaki+16

Entropy

t= 0102 ms



回転モデルからのニュートリノ信号

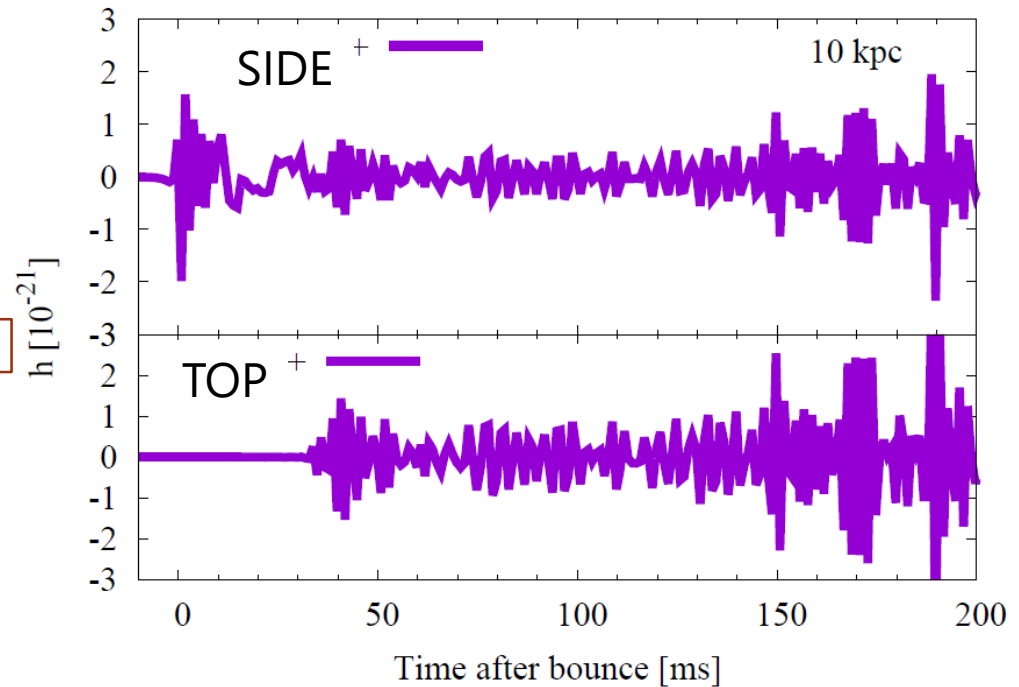
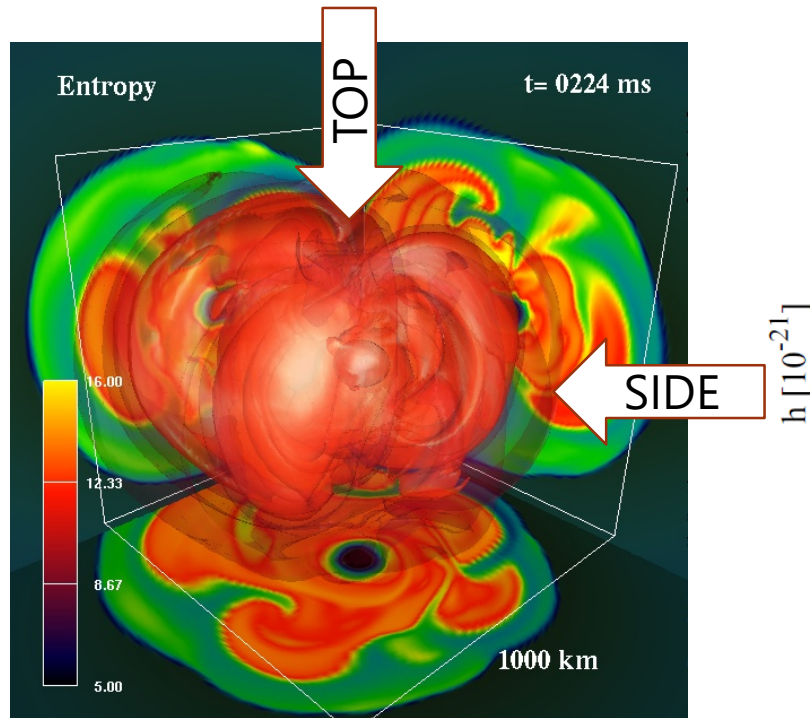


Takiwaki+ in prep

赤道からみると

自転周波数に対応する時間振動が見える！

GW signals from rotating model



Takiwaki+ in prep

重力波でもやはり
自転周波数に対応する振動が見える

公募研究

- 公募研究1(2015-2016年度)
ニュートリノ観測に拠る超新星内の流体不安定性の解明
- 公募研究2(2017-2018年度)
超新星ニュートリノの系統的予言

超新星爆発の ν で何が分かりたいのか？

超新星から来るニュートリノを見て……

天文としての問題

石徹白計画研究

超新星の親星が知りたい

超新星の爆発機構が知りたい

超新星率、BH生成率が知りたい

滝脇公募研究1

中村公募研究

中里公募研究

核物理・ニュートリノ物理

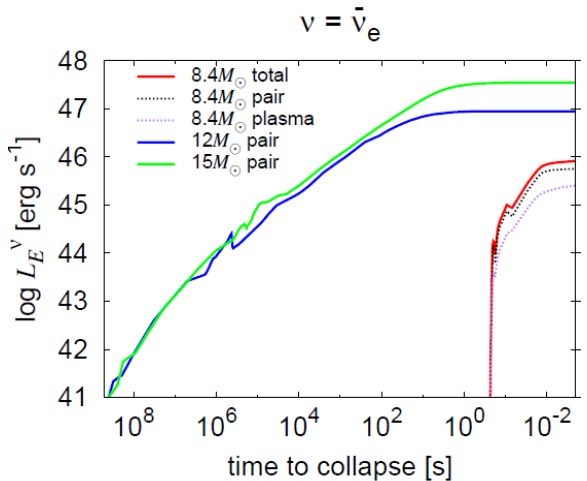
原子核の硬さが知りたい

ニュートリノの性質が知りたい

滝脇公募研究2

Three phases of supernovae

前兆ニュートリノ

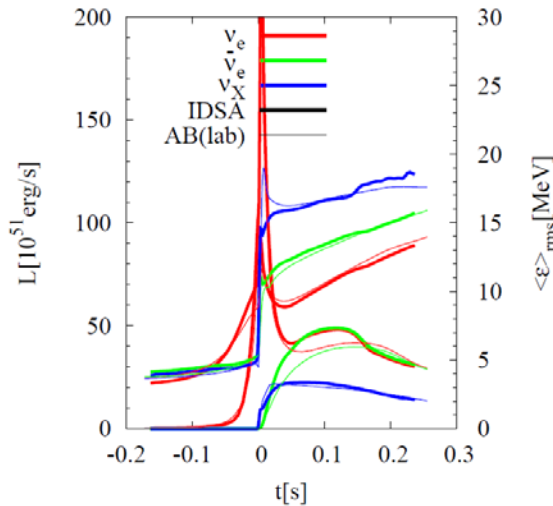


Kato+2015

石徹白さん

100s

バーストフェイズ
降着フェイズ

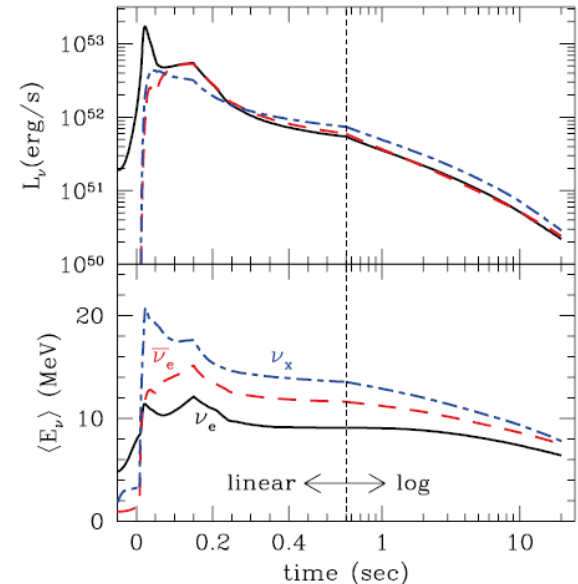


Takiwaki in prep.

滝脇知也, 中村航さん

1s

冷却フェイズ



Nakazato+2013

中里 健一郎さん

10s

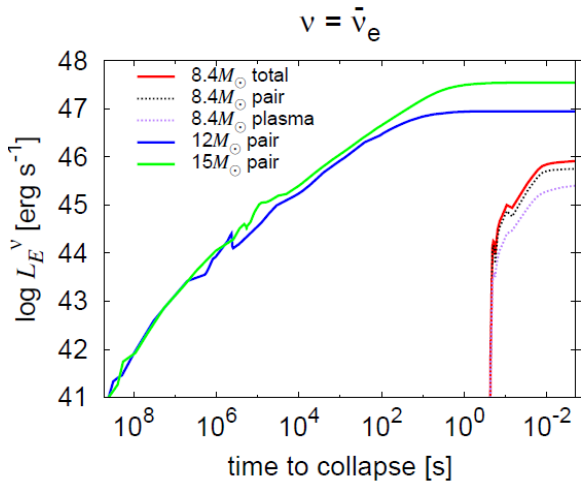
超新星がニュートリノを出すフェイズは3つに分けられている

Three phases of supernovae

前兆ニュートリノ

バーストフェイズ
降着フェイズ

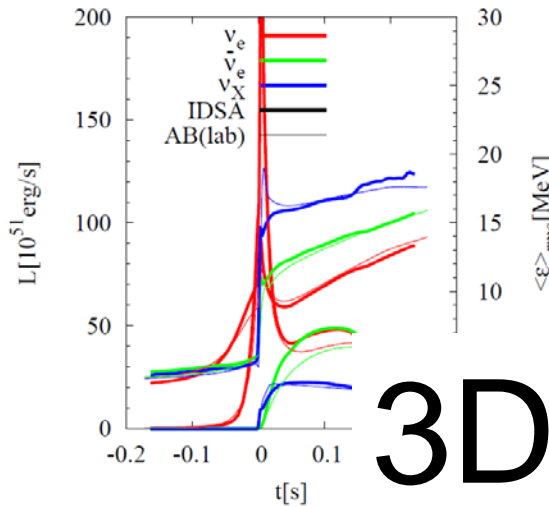
冷却フェイズ



Kato+2015

石徹白さん

100s

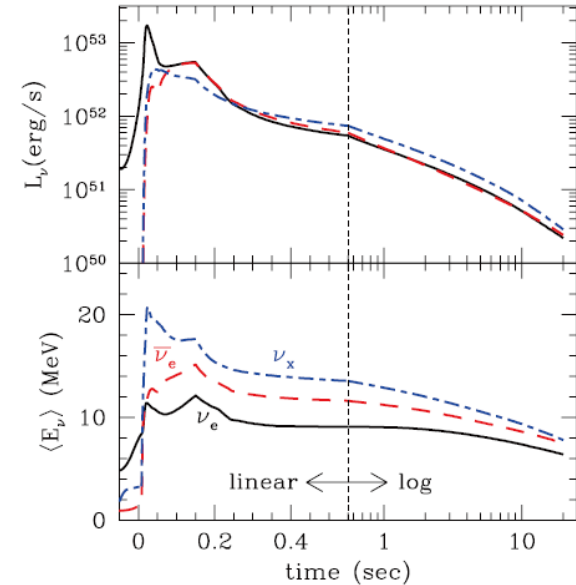


3D

Takiwaki in prep.

滝脇知也, 中村航さん

1s



Nakazato+2013

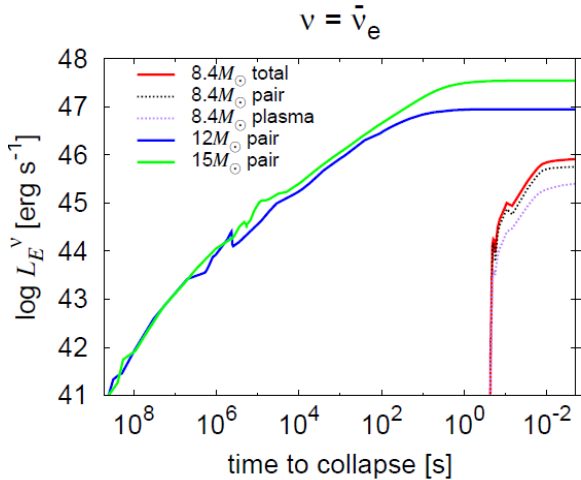
中里 健一郎さん

10s

前回の公募研究は衝撃波が復活するかどうかを主眼にしつつ、1秒以内のニュートリノ放射を議論

Three phases of supernovae

前兆ニュートリノ

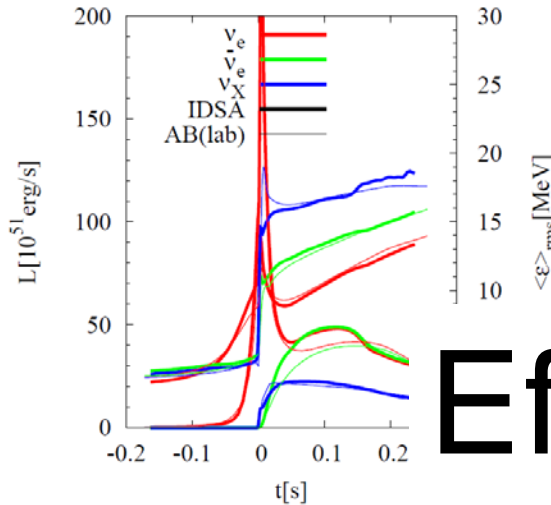


Kato+2015

石徹白さん

100s

バーストフェイズ
降着フェイズ

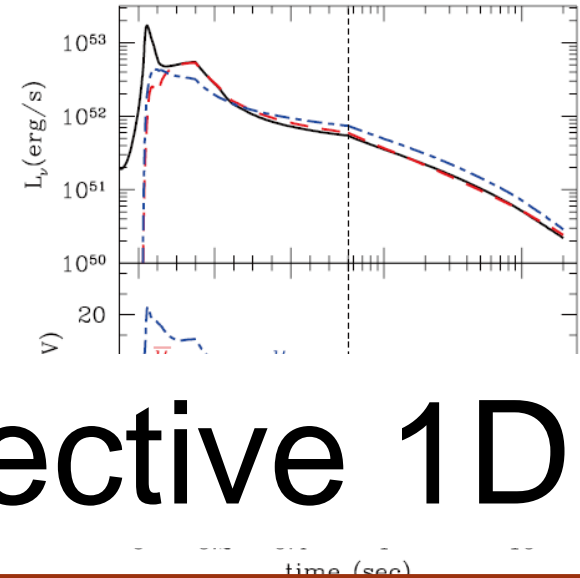


Takiwaki in prep.

滝脇知也, 中村航さん

1s

冷却フェイズ



Nakazato+2013

中里 健一郎さん

10s

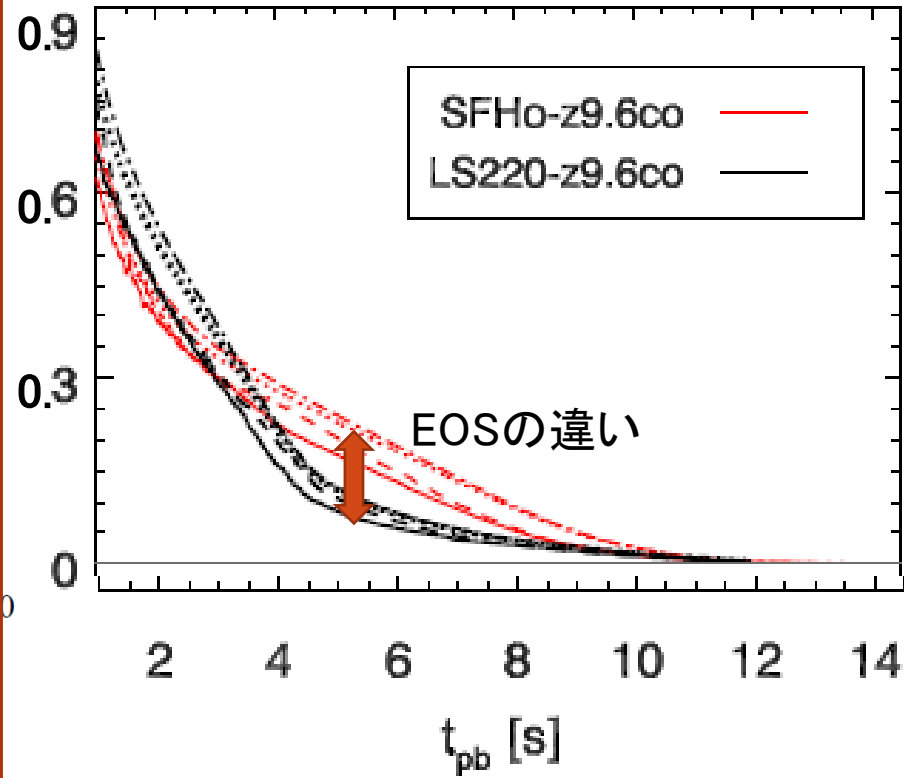
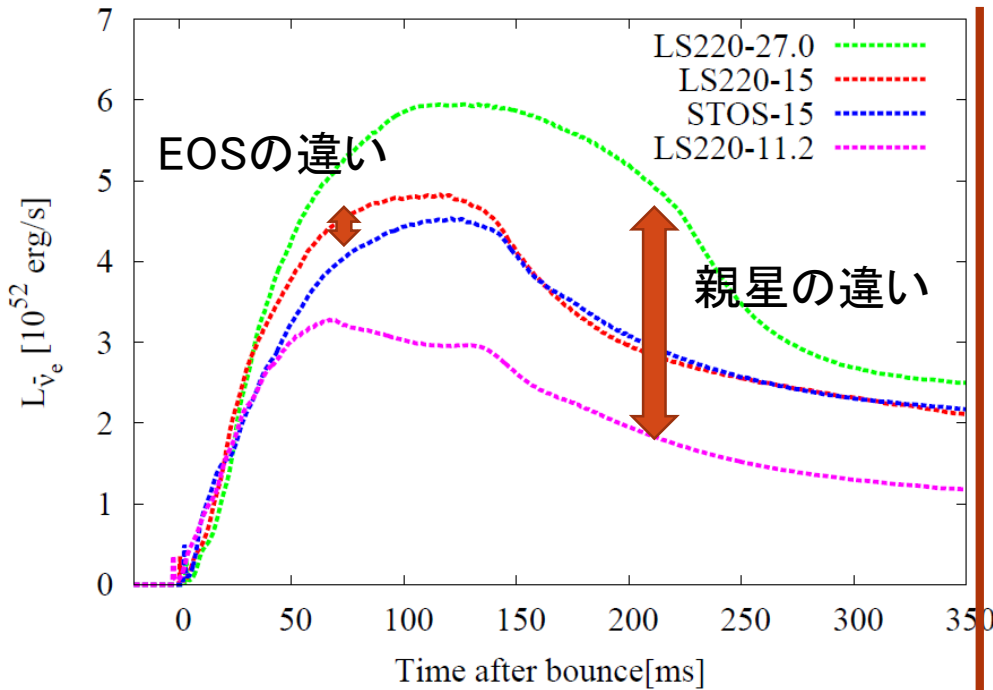
Effective 1D

今回の公募研究は1秒以後の時間発展も追う。

Effective: 爆発をまねるため質量降着率を下げる

人工的な対流な効果。中里さんの1/100ぐらいの資源で。

状態方程式依存性



降着フェイズではそれほど
状態方程式に依らず、親星
依存性が分かる

冷却フェイズでは状態方程
式依存性が表れる

ニュートリノ振動

$$r = 10\text{km}, \rho = 10^{10}\text{g/cm}^3$$

Neutrinos Trapped

$$r = 100\text{km}, \rho = 10^7\text{g/cm}^3$$

Collective Effect

$$r = 1000\text{km}, \rho = 10^{-1}\text{g/cm}^3$$

MSW Effect

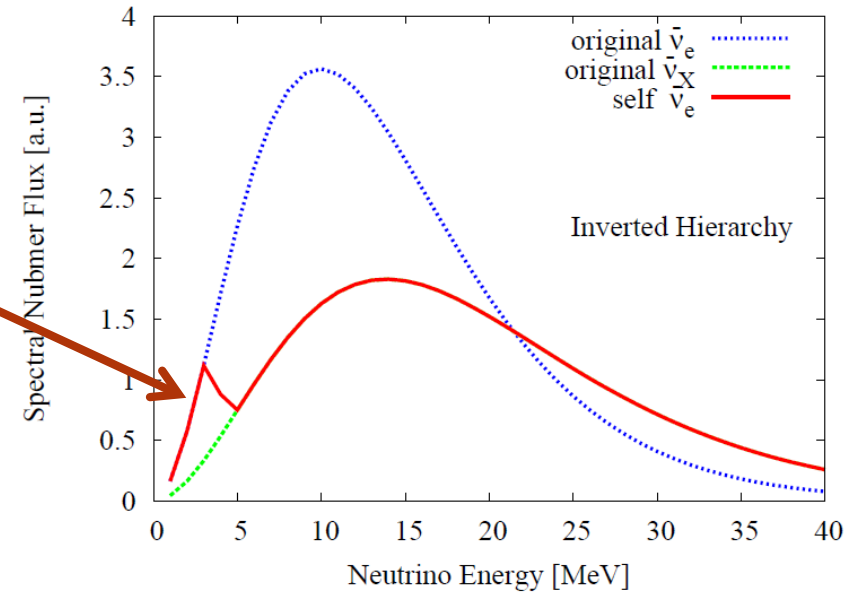
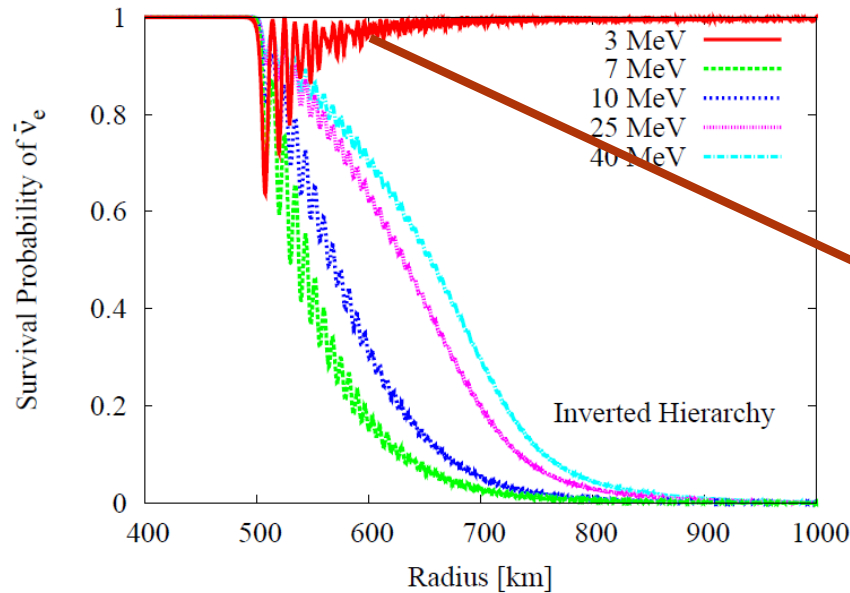
$$r = 1\text{kpc}, \rho = 0\text{g/cm}^3$$

Vacuum Oscillation



ニュートリノそのものや物質との相互作用により
エフェクティブに質量が変わり、 ν 振動が起こる

ニュートリノ振動



s11.2, 200ms

SKのThresholdである7MeV以下に、

ν 振動の典型的なスプリットが出ることもある(出ないことも)。

KamLANDとの同時観測でスプリットの同定ができないか？

多くのシミュレーションでこれが出る時間帯を特定したい。

まとめ

- 公募研究1(2015-2016年度)
ニュートリノ観測に拠る超新星内の流体不安定性の解明

3Dシミュレーションを実行

(1)SASIからくるニュートリノに時間変動

(2)高速自転でスパイラルモード、ニュートリノに時間振動
爆発メカニズムの解明に役だつ

- 公募研究2(2017-2018年度)
超新星ニュートリノの系統的予言
1次元現象論的モデルを多数実行
親星、EOSが ν 観測量に与える影響を調べる
 ν 振動で7MeV以下にスプリットが出る場合を精査
SKとKamLANDの共同観測での同定可能性を議論